

王喜龙, 杨梦尧, 郭红霞, 等. 2022. 辽宁盘一井氢气浓度异常特征及预报效能分析[J]. 地震研究, 45(2): 275–283, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0026.

Wang X L, Yang M Y, Guo H X, et al. 2022. Analysis of the anomalies and earthquake-prediction efficiency of Hydrogen in groundwater in Panjin 1st well, Liaoning Province[J]. *Journal of Seismological Research*, 45(2): 275–283, doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0026.

# 辽宁盘一井氢气浓度异常特征及预报效能分析\*

王喜龙<sup>1</sup>, 杨梦尧<sup>2\*</sup>, 郭红霞<sup>1</sup>, 刘建光<sup>1</sup>

(1. 辽宁省地震局, 辽宁 沈阳 110034; 2. 辽宁省汇泽矿业技术咨询有限公司, 辽宁 沈阳 110035)

**摘要:** 为了对2020年辽宁盘锦台盘一井氢气出现的异常及预报效能进行分析, 在排除外界干扰的基础上, 结合地震活动性特征及应用临界慢化方法对氢气进行异常识别。结果表明: 盘一井氢气浓度出现的高值变化主要与辽南地区2019年10月以来的构造活动增强以及盖州震群地震活动增强有一定成因关联, 此次异常对应了2020年唐山古冶5.1级地震。应用R值评分方法对氢气预报效能进行检验, 计算得到盘一井氢气R值为0.48, 通过效能检验, 表明盘一井氢气对于辽宁地区地震预测具有较好指示意义。

**关键词:** 氢气; 异常特征; 预报效能; 盘一井

**中图分类号:** P315.724

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2022)02-0275-09

doi: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2022.0026

## 0 引言

地震是构造活动的产物, 而构造活动则与地下流体作用关系紧密。大量研究表明, 某些中强地震发生前, 在震中一定范围内, 或沿着发震断裂展布方向往往都会出现一定数量的地下流体异常(刘耀炜等, 1999, 2004; Zhou et al., 2021a)。而对于地下流体异常组分而言, 不论是浅层还是深层地下流体, 氢气均扮演了非常重要的角色(Zgonnik, 2020; Zhou et al., 2021b), 这主要是由于氢气的地球化学性质所致。与其他幔源气体相比, 氢气穿透力最强, 扩散迁移速率较其他气体快(杜乐天, 2005; 范雪芳等, 2016; 车用太等, 2015; 方震等, 2020)。因此, 氢气成为对地震前兆响应最为灵敏的气体, 尤其在地震发生短临阶段, 其映震能力明显优于其他测项(柯云龙等,

2018)。因此, 氢气作为可灵敏有效反映构造活动状态或指示区域应力场变化的地下流体介质, 在地震监测工作中越来越受到重视。

国内外关于氢气观测与地震活动的关系研究已有近50年历史。国外较早开展这方面研究的国家是日本、美国和前苏联, 随后多国学者们也逐渐开展氢气观测研究, 并取得了一定数量的地震前兆和同震响应震例(Satake et al., 1985; 杉崎隆一等, 1986; 杜乐天, 2005; 车用太等, 2015)。我国最早从20世纪70年代开始开展断裂带井(泉)地下水氢气定时采样观测研究(张培仁, 王基华, 1993), 近年来随着观测技术的不断提高, 氢气观测仪器及观测手段也逐渐多样化。观测仪器由最早的气相色谱仪, 逐渐发展出QDS-A型气敏仪、GWK-A型测氢仪和ATG-6118H型测氢仪等多种仪器(车用太等, 2015); 观测手段也由最开始的地下井(泉)定时取样观测, 逐渐发展

\* 收稿日期: 2022-01-19.

**基金项目:** 中国地震局震情跟踪定向工作任务(2022010301、2021010303), 辽宁省科技厅项目(2019010223-JH8/103)与地震科技星火计划项目(XH20003Y)联合资助。

**第一作者简介:** 王喜龙(1988-), 工程师, 主要从事流体地球化学研究. E-mail: 546737333@qq.com.

**✉ 通讯作者简介:** 杨梦尧(1988-), 工程师, 主要从事地质矿产评估等研究. E-mail: 445622259@qq.com.

为包括定点取样观测、地下井泉连续观测（李新勇等，2014；方震等，2020；Zhou *et al.*, 2021）、跨断层土壤气观测（王喜龙等，2017；康健等，2019；Xiang *et al.*, 2020）和断裂带土壤气定点连续观测（范雪芳等，2016；向阳等，2018a；柯云龙等，2018；陈学芬等，2020）等多种手段并行。地震工作者通过多手段、多仪器观测方式，获取了大量的氢气观测数据，并在某些中强地震发生前捕捉到了一些非常明显的氢气短临异常震例信息（范树全等，1993；张培仁，王基华，1993；林元武，翟盛华，1994；范雪芳等，2016；向阳等，2018a），为地震监测预报工作积累了宝贵的经验。

盘锦台盘一井氢气测点地处下辽河平原，且位于 NE 向展布的郯庐断裂带北段与 NW 向展布的海城河隐伏断裂西延展带交汇部位。复杂的构造位置导致该测点对辽宁及周边地区地震响应敏感。1975 年辽宁海城 7.3 级地震、1976 年河北唐山 7.8 级地震、1999 年辽宁岫岩 5.4 级地震与 2013 年辽宁灯塔 5.1 级地震发生前，该测点水氢、氢气与离子等均出现了不同程度的异常变化。2020 年 5 月 2 日盘锦台盘一井氢气浓度出现大幅度波动及升高异常变化，此次异常变化是由人为、环境等干扰造成的，还是由区域应力场调整变化等引起的，需要进行异常识别及效能检验。因此，笔者从干扰因素调查分析、震例对比分析、地震活动性分析和应用临界慢化方法进行氢气高频异常识别分析等方面，对盘锦台盘一井氢气进行异常识别，同时应用  $R$  值分析方法对氢气预报效能进行检验，分析盘一井氢气异常成因机理及预报指示意义。

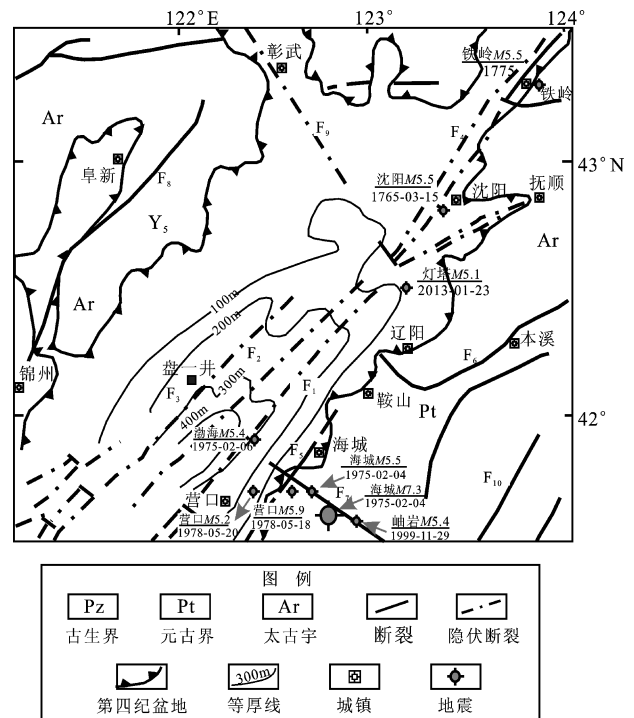
## 1 地震地质背景与观测井概况

### 1.1 地震地质背景

研究区内出露地层主要为第四系平原组、上第三系明化镇组与馆陶组地层。第四系平原组地层岩性主要为砂岩和粘土等，上第三系地层岩性主要为砂砾岩、砂岩和泥岩等。大地构造方面，研究区地处中朝准地台上的三级构造单元下辽河拗陷内，东部为辽东隆起，西部为燕山褶皱带，北依内蒙地轴与松辽盆地相隔（图 1），由前震旦纪伟晶岩组成基底，属三面环山、一面临海的汇

水盆地（王喜龙等，2018）。

研究区断裂构造发育，著名的 NE 向深大断裂带——郯庐断裂带穿过该区，在该区域主要表现为 3 条 NE 向深大断裂，自西向东分别为台安断裂、辽中断裂和牛居—油燕沟断裂（图 1）。盘一井位于郯庐断裂带上，距观测井最近的断裂为牛居—油燕沟断裂。该测点还位于 NW 向展布的海城河断裂西延展带上。在盘一井测点周边 300 km 范围内及沿郯庐断裂带展布方向上，现代曾发生过多次破坏性地震（图 1），且在多次破坏性地震发生前，该测点均出现过明显的长、中、短、临等不同程度流体异常，表明该井地下流体异常对于辽宁及邻区地震危险性具有较好指示意义。



F<sub>1</sub>: 牛居—油燕沟断裂; F<sub>2</sub>: 辽中断裂; F<sub>3</sub>: 台安断裂;  
F<sub>4</sub>: 依兰伊通断裂; F<sub>5</sub>: 锦州断裂; F<sub>6</sub>: 太子河断裂;  
F<sub>7</sub>: 海城河断裂; F<sub>8</sub>: 医巫闾山西侧断裂; F<sub>9</sub>: 红旗  
营子断裂; F<sub>10</sub>: 塔子岭—翁泉沟断裂

图 1 盘锦地区地震地质简图

Fig. 1 Sketch map showing tectonic setting and historical earthquakes in Panjin area

### 1.2 观测井概况

盘一井氢气观测点位于盘锦地震台院内，该井自 1973 年开始地震观测。该井前身属辽河油田井，完钻井深 2 892 m，现有井深 1 121 m。观测含

水层为 835 ~ 955 m 的馆陶组裂隙承压水, 该含水层厚度 120 m, 水温 22 ℃, pH 值为 7.4。井孔套管直径在 0 ~ 86.49 m 段为 400.05 mm, 在 86.49 ~ 955.1 m 段为 224.73 mm, 具体井孔参数见王喜龙等 (2018) 的研究。井孔条件造成该井受地表垂直补给能力差, 基本不受大气降水和地表水的干扰, 同时也避免了油田开采层的影响, 水质主要受深部补给 (王喜龙等, 2018)。

## 2 观测台项

盘一井观测手段丰富, 主要包括水氢、气氢、汞、离子和气体, 其中水氢观测开始于 1973 年。气体观测分为两个时间段: 1995 年 1 月至 2018 年 1 月观测仪器为 SQ-206 气相色谱仪, 进行  $H_2$ 、 $CO_2$ 、Ar、 $N_2$  和  $CH_4$  5 种气体观测, 由于 SQ-206 气相色谱仪为模拟观测, 观测精度相对较低, 对于取样水中  $H_2$ , 平时基本检测不到。2018 年 1 月 SQ-206 气相色谱仪因仪器故障无法修复, 2018 年 3 月开始使用 GC-8600 气相色谱仪进行  $H_2$ 、He、 $CO_2$ 、 $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CH_4$  和气体流量 7 个测项观测。GC-8600 气相色谱仪灵敏度  $S \geq 5\,000\text{ mv} \cdot \text{mL}/\text{mg}$ , 检测限  $M_L \leq 1 \times 10^{-11}\text{ g/s}$ , 柱箱温度范围为 5 ℃ ~ 400 ℃, 控温精度为  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。盘锦台气体观测虽然至今交替更换了多个观测人员, 但观测数据连续稳定。

## 3 观测数据异常变化及干扰因素分析

### 3.1 氢气浓度异常变化特征

盘一井自 2018 年 3 月改用 GC-8600 气相色谱仪进行观测以来, 氢气浓度测值波动幅度相对较为稳定, 在能检测出氢气值时段, 数值基本保持在 0 ~ 23 ppm 波动。但自 2020 年 5 月 2 日开始, 氢气浓度开始出现高值波动变化, 测值最大可达 68 ppm, 高出正常背景值近 3 倍。2020 年 5—7 月, 氢气浓度有逐渐升高趋势 (图 2a), 至 2020 年 7 月 8 日, 达到最大值后便迅速恢复下降。在下降过程中, 7 月 12 日唐山古冶发生 5.1 级地震, 地震发生后氢气浓度迅速恢复, 至 7 月 20 日已完全恢复至正常背景水平。

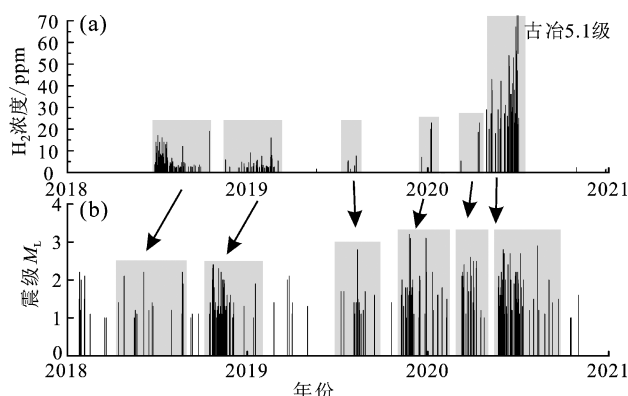


图2 盘一井氢气浓度变化 (a) 与青石岭震群  $M-t$  序列变化 (b) 对比图

Fig. 2 Relation between the hydrogen variation Panjin 1st well (a) and the Magnitude - Time sequence of the Qingshling earthquake swarm (b)

### 3.2 干扰因素分析

笔者联合仪器维修专家和台站工作人员对气相色谱仪进行检查, 并在当日再次进行取样以及标准样品和天然样品的测量。将测量计算结果与当日观测结果进行对比, 结果显示两次结果相近, 基本无差异变化, 表明气相色谱仪器工作正常。对氢气采样井口及测试流程进行调查, 井水流量也未发生改变, 观测人员的测试操作流程均符合观测技术规范要求。笔者对附近地区地下水开采情况、铁路等施工建设以及矿山开采等自然环境干扰因素开展调查时发现, 在盘一井氢气出现异常时段内, 测点周边一定范围并未出现可造成氢气浓度异常的环境干扰现象。综合以上对各方面进行的测试调查结果, 基本排除仪器、人为和自然环境干扰等因素造成本次氢气的异常变化。

### 3.3 同井观测数据对比分析

盘一井具有流体测项丰富、观测时间长且受环境干扰影响小等特点。地下流体自观测以来数据变化稳定, 且水氢、离子等多个测项在辽宁及邻区的一些中强地震发生前均出现过显著异常变化 (王喜龙等, 2016)。笔者将 2020 年盘一井氢气浓度出现的高值异常变化, 与该井其它流体测项观测数据进行对比分析发现, 该时段盘一井其它流体测项并未出现与之同步的异常变化。虽无配套的地下流体异常同步出现, 但也间接表明氢

气测项较其它测项映震更为灵敏,这可能主要与氢气本身地球化学性质及异常成因机制有关。

## 4 讨论与认识

### 4.1 氢气浓度异常成因分析

国内外学者通过对氢气观测异常机制的研究,认为氢气浓度升高的机制主要存在3种观点。第一种观点认为在成岩及地壳运动过程中,地壳深部上涌的地质流体(气体)被赋存于岩石孔隙、裂隙中。在地震孕育发展过程中,由于受到构造应力等作用,岩石产生新的裂隙并与旧裂隙连通,导致旧裂隙中赋存的地质流体(气体)因压力减小而迅速迁移至地表,造成氢浓度升高(张培仁,王基华,1993)。第二种观点认为岩石破裂释放氢气。地下岩石因受到超声振动作用而产生微裂隙,微裂隙发育会释放岩石中的封闭氢和吸附氢(McGee *et al.*, 1982, 1983; 冯玮等, 1985)。这一观点已在实验室岩石破裂实验中得到证实。实验结果表明岩浆岩氢气释放程度较高,变质岩氢气释放程度主要受母岩性质控制,沉积岩中氢气释放较少,甚至几乎没有氢气逸出(范树全,高清武,1980; 林元武,翟盛华,1994)。盘一井地处下辽河平原,沉积层较厚,可达千米以上,井孔围岩主要以砂岩、泥岩等沉积岩为主,无岩浆岩与变质岩。笔者对比氢气浓度变化,认为氢气来自基岩岩石内封闭氢和吸附氢的可能性较低。第三种观点认为水-岩反应导致氢气浓度升高。在地震孕育发生过程中,由于应力增强,导致岩石破裂,产生大量的微裂隙和岩石新鲜破裂面,流入微裂隙的地下水与岩石新鲜破裂面发生作用产生氢气,导致氢气浓度升高,此种方式也被实验所证实(Wakita *et al.*, 1980; 范树全,高清武,1980; Kita *et al.*, 1982; 林元武,翟盛华,1994)。

基于以上3种氢气浓度异常成因的分析可以发现,不论哪种成因,都是在地震孕育过程中,由于地下岩石受到应力积累增强的作用,地下温压条件发生改变,进而导致氢气的释放,并渗透、扩散至地表,出现氢气浓度高值异常。前人进行的水压致裂实验也表明,氢的最大释放是在岩石破裂卸载之后,破裂卸载一瞬间,氢因通道打开

而迅速扩散升高,造成氢气高值异常(范树全等,1993)。

基于上述对观测仪器、测点、采样测试过程及周边环境调查的结果,基本可以排除观测系统、人为及自然环境因素等对氢气浓度升高造成的影响。结合氢气自身地球化学性质及异常产生机理则可认为,此次氢气浓度出现的高值变化可能是应力应变影响下的地震前兆信息。为验证这一推测,笔者从震例对比、地震活动性和高频信息异常分析等方面进行了论证,并结合R值评分方法对该测项进行了预报效能检验。

### 4.2 震例对比分析

盘一井氢气自1995年开始观测以来,虽然经历了SQ-206与GC-8600两套气相色谱仪器的更迭,观测方式也由模拟改为了数字化,但观测质量一直相对较好。氢气观测曾在1999年11月29日岫岩5.4级地震前出现显著异常变化。1995—2018年盘一井基本观测不到氢气,但1999年11月4日,即在岫岩5.4级地震发生前一个月,该测点氢气浓度出现显著短临异常变化(图3)。氢气浓度在11月4—29日共出现3次变化:11月4—14日,氢气浓度值较低且变化较为平稳,在0~290 ppm波动;11月15—26日氢气浓度有一定幅度升高,在140~510 ppm波动;11月27日,氢气浓度开始出现显著加速上升变化,至28日达最大值(1 800 ppm),29日开始下降恢复,恢复过程中发生岫岩5.4级地震,震后再次不能观测到氢气测值。

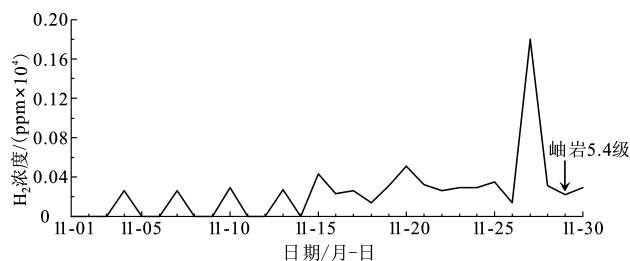


图3 1999年岫岩5.4级地震氢气浓度日变化  
Fig. 3 Daily observation curves of hydrogen at Panjin 1st well before the 1999 Xiuyan  $M_s5.4$  earthquake

将1999年岫岩5.4级地震前氢气浓度变化与2020年古冶5.1级地震氢气浓度值异常变化进行对比分析(图2a, 3),发现二者观测曲线变化形

态具有一定相似性, 即均表现为高值波动且伴随上升变化, 并在震前4天达到最高值, 而后在下降恢复过程中发震, 震后曲线恢复速度同样非常迅速。但两次地震异常持续时间存在一定差异, 岫岩5.4级地震前, 异常维持1个月, 而古冶5.1级地震发生前, 异常持续近2个月。将两次氢气浓度变化幅度进行对比分析, 岫岩地震前氢气浓度变化范围为0~1 800 ppm, 而古冶5.1级地震前氢气浓度变化范围为0~67 ppm, 二者最大值相差约27倍, 变化幅度存在较大差异。

笔者认为造成这两种差异变化可能主要存在两方面原因。一是两套气相色谱仪器观测精度存在一定差异。两次地震氢气浓度异常被两套不同的氢观测仪记录, 虽然仪器均为气相色谱仪, 观测原理也基本相同, 但模拟与数字化观测精度却存在一定差异, 可能会造成氢气浓度变化幅度的差异。二是两次地震发生前, 盘一井测点受到的区域应力差异不同。从震中距及构造位置(图4)进行分析可以得出, 1999年岫岩5.4级地震的发震断裂为海城河隐伏断裂, 盘一井氢气测点距震中仅118 km。海城河断裂为一隐伏断裂, 在下辽河平原区虽然由于第四系覆盖, 地表上并未发现断层错断等地质地貌特征, 但结合历史小震空间分布不难发现其有向NW向延伸至辽西地区的明显特征。而盘一井测点恰位于海城河断裂NW向延展带上, 说明海城河隐伏断裂活动对该测点作用效果明显, 岫岩5.4级地震发生前该测点水氢、离子及气体等多测项出现同步性显著异常变化可验证这一观点。古冶5.1级地震发生在唐山老震区, 距盘一井氢气测点约340 km(图4), 震中距较远, 只存在大地构造(郯庐断裂带)方面的影响。对比两次地震可以发现, 二者不论在构造位置还是在震中距影响上, 均存在一定差异性, 因此可能导致盘一井测点在两次地震前所受区域应力大小存在一定差异影响, 造成了氢气浓度及变化形态的不同。

张培仁和王基华(1993)曾对1976—1991年首都圈地区发生的多次地震进行总结, 发现氢气异常幅度与未来地震的强度之间无显著对应关系。氢气异常强度大小主要可能与测点所处位置的构造活动及区域应力强弱有关(林元武, 翟盛华,

1994; 王博, 周永胜, 2017)。笔者对1999年岫岩5.4级地震发生前辽宁地区尤其是盘锦地区地下流体出现的异常进行分析, 发现在岫岩5.4级地震前, 辽宁盘锦地区多个地下流体井出现与氢气浓度高值变化同步的短临异常变化, 如盘一井水氢、盘一井 $\text{Cl}^-$ 、盘锦兴一井水位、盘锦高七井水位、水温和荣二井水位等(佟占岭等, 2000; 陈棋福等, 2002; Zhou *et al*, 2020)。而古冶5.1级地震前, 盘锦地区除盘一井氢气浓度出现异常变化外, 其他地下流体测项未有异常同步出现, 异常数量少, 表明此次盘一井氢气浓度出现的高值异常主要可能表现为受区域应力的影响, 具有场兆效应, 且应力水平低于1999年岫岩5.4级地震前的应力水平。

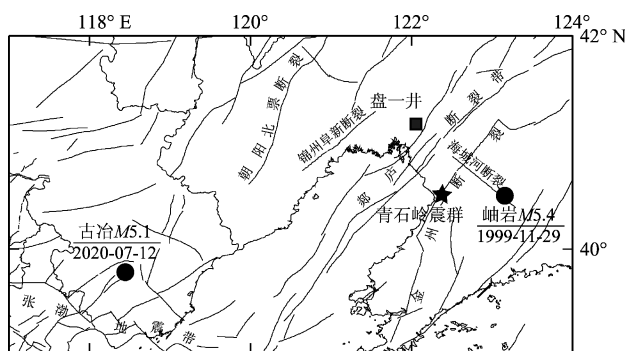


图4 盘一井测点与两次地震位置关系图

Fig. 4 Location of Panjin 1st well, the Guye M5.1 earthquake, and the Xiuyan M5.4 earthquake

#### 4.3 地震活动性分析

地震活动可以有效直观地反映出区域应力的变化。为了验证盘一井氢气出现的高值波动变化与区域构造应力增强有关, 笔者对辽南地区2018年以来一直在活动的盖州青石岭震群进行了分析(图4, 2b)。从图2b可以看出, 盘一井氢气浓度变化与青石岭震群小震起伏活动存在较好对应关系。自2018年以来, 盘一井氢气浓度每出现一次波动变化, 盖州青石岭地区均会出现一丛较为明显的小震起伏活动。尤其是2020年1月和4—7月以来, 盘一井氢气浓度波动幅度较2018—2019年有较为明显的增强变化, 而青石岭震群则在2019年11月出现比较密集、震级有所增强的3丛地震活动, 分别为2019年11月至2020年2月初、

2020 年 3—4 月、2020 年 5—9 月。与盘一井在 2020 年 5 月开始出现的较为显著的氢气高值波动变化相对比,青石岭地区地震活动不论频次还是震级均较以往有明显增强。2020 年 7 月盘一井氢气浓度逐渐恢复正常后,青石岭震群小震活动也有所减弱。青石岭震群起伏活动表明,2019 年底至 2020 年辽南地区地震活动有所增强,且地震活动与盘一井氢气浓度有较好对应关系,表明氢气浓度升高变化与辽南地区地震活动增强存在一定因果联系。

#### 4.4 临界慢化高频异常分析

临界慢化是指动力系统由一种相态向另一种相态发生转变之前,系统在趋近于临界点过程中,会出现有利于新相形成的分散涨落现象,这种分散涨落可表现为幅度增大、持续时间拉长、扰动恢复速率变慢及回复到旧相能力变小等现象,而这种现象便被称为临界慢化现象(于泳,郝柏林,1984;晏锐等,2011)。该方法基于岩石加载破裂实验和统计物理学得来(张浪平等,2010)。近年来,该方法在地震监测预报分析领域得到应用,主要用来提取地球物理观测数据中潜在的前兆高频异常信息,对探索震前异常机理、判定异常所处阶段及提高地震预测水平具有一定的意义,该方法已在一些地震分析总结研究中得到证实(晏锐等,2011;高丽娟等,2013;王熠熙等,2018;苏小芸等,2020)。笔者在对盘锦台氢气的现场核实过程中,由于未发现环境干扰及观测仪器问题,因此应用临界慢化方法对盘锦台氢气观测数据进

行高频异常分析,具体计算分析方法参见晏锐等(2011)的研究。

笔者应用该方法分别计算了盘一井氢气的高频信息,能够表征临界慢化现象的自相关系数  $Ar$  和方差  $Var$ 。从图 5 可以看出,对盘一井氢气原始数据进行去趋势提取的高频信息显示,2020 年 5 月氢气高频信息开始出现同步高值波动变化,于 7 月 12 日古冶 5.1 级地震发生后恢复。高频信息与氢气浓度原始数据具有高度同步变化特征。自相关系数  $Ar$  和方差  $Var$  两个参数数据变化特征显示:方差  $Var$  在 2020 年 4 月开始出现显著升高异常变化,至 2020 年 7 月初达最大值,高出正常背景值近 4 倍;自相关系数  $Ar$  在 2020 年 3 月开始出现上升趋势变化,于古冶 5.1 级地震发生后继续持续上升,同年 9 月达最高值后恢复下降。盘一井氢气浓度、高频信息、方差与自相关系数均显示出,在古冶 5.1 级地震发生前出现了显著异常高值变化,且高值起始时间具有同步性变化特征。前人基于临界慢化方法对汶川 8.0 级地震前南北地震带水氡观测资料(晏锐等,2011)、2011 年新疆 2 次 6 级以上地震前新疆地区形变和流体资料(高丽娟等,2013)和 2013 年岷县—漳县 6.6 级地震甘东南地区水氡观测资料做了大量研究(苏小芸等,2020),认为应用该方法提取的高频异常可以有效指示地震活动及区域构造应力变化。笔者应用临界慢化方法提取盘一井氢气的高频信息异常并分析认为,2020 年盘一井氢气出现的高值变化与区域地震活动及构造应力增强存在一定因果联系。

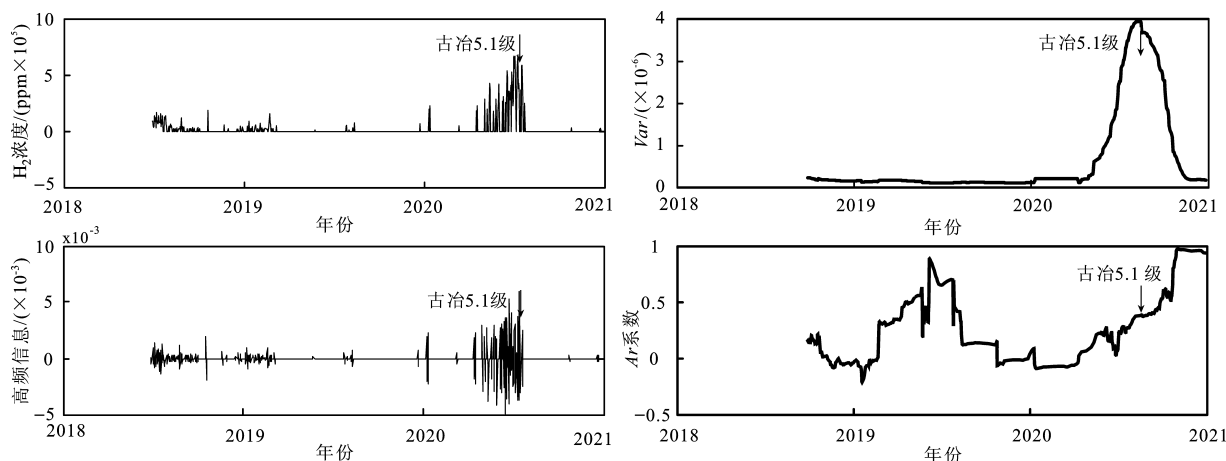


图 5 古冶 5.1 级地震前盘一井氢气临界慢化现象曲线

Fig. 5 Critical slowdown curves of hydrogen in Panjin 1st well before the Guye  $M_{5.1}$  earthquake

4.5 预报效能分析

在地震行业预报效能评价中，最常见的地震预报效能评估方法包括  $R$  值评分方法、Molchan 图表法和权重集成方法等（焦明若等，2016；向阳等，2018b；王喜龙等，2018，2020；崔博文等，2021；钟骏等，2021）。其中  $R$  值评分方法是一种比较直观易懂的效能检验研究方法，在地震研究领域得到最为广泛的应用。笔者结合辽宁及周边地区已发生的中强地震，对盘一井氢气预报效能进行检验。

$R$  值评分方法由许绍燮（1989）提出，用来对各地震监测项预报效能进行检验，并取得了较好的研究成果（李琼等，2017；汤兰荣等，2017；陈梦，杨龙翔，2020）。 $R$  值评分基本原理为有震报准率与预报占时率之差，可表示为：

$$R = c - b$$
$$= \frac{\text{报对地震次数}}{\text{应预报地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究总时间}} \quad (1)$$

式中： $c$  为地震报准率； $b$  为预报时间占有率。

将计算所得的  $R$  值与具有 97.5% 置信水平的最低  $R$  值（ $R_0$ ）进行比较（ $R_0$  值大小与报对地震数量、漏报地震数量有关），若  $R > 0$  且  $R \geq R_0$ ，则表示通过效能检验， $R$  值越大且  $R - R_0$  越大，则说明预报效能越好。

本文在使用  $R$  值检验方法对盘一井氢气进行预报效能评估过程中，选取时间范围为自氢气观测以来，空间上选取距测点 200 km 范围内或存在构造关系的  $M \geq 5.0$  地震进行研究，共选取 4 个地震（表 1）。基于相关文献资料统计了自 1995 年以来盘一井氢气浓度出现的异常次数、异常持续时间及对应震例情况，具体见表 2。

表 1 1995 年以来研究区  $M \geq 5.0$  地震

Tab. 1  $M \geq 5.0$  earthquakes in the study area since 1995

序号	发震日期	地点	$\lambda_E/(^{\circ})$	$\varphi_N/(^{\circ})$	$M$
1	1999-11-29	辽宁岫岩	123.04	40.54	5.4
2	2013-01-23	辽宁灯塔	123.20	41.50	5.1
3	2013-04-22	内蒙科尔沁	122.40	42.90	5.3
4	2020-07-12	唐山古冶	118.44	39.78	5.1

表 2 盘一井氢气浓度异常时间及对应震例统计

Tab. 2 Abnormal periods of the hydrogen in Panjin 1st well and the corresponding earthquakes

序号	异常出现 时间范围	异常持续 时间/月	对应地震	震中距/ km
1	1999 年 11—12 月	1	岫岩 5.4 级	113
2	2020 年 5—7 月	3	古冶 5.1 级	340

基于式（1）得出，盘一井氢气浓度异常优势预测时长为 80 ~ 110 d，在已发生的 4 次地震中，报准地震 2 次，漏报地震 2 次，虚报地震 0 次。预测效能  $R$  值为 0.48、 $R_0$  值为 0.43、 $R \geq R_0$ ，通过效能检验，表明盘一井氢气具有较好的短临预报效能（图 6）。

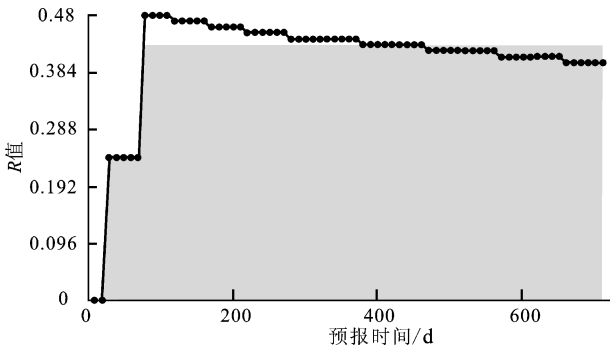


图 6 盘一井氢气  $R$  值检验结果

Fig. 6  $R$ -value test of the hydrogen in Panjin 1st well

5 结论

本文通过对盘一井氢气浓度异常特征进行分析，在排除外界干扰基础上，结合震例对比、氢气异常成因机制、地震活动性及临界慢化高频异常识别等方面进行分析，并结合  $R$  值评分方法对盘一井氢气进行预报效能检验，得出以下结论：

（1）2020 年盘一井氢气浓度出现的高值波动及升高变化与 2019 年下旬以来辽南及环渤海地区地震活动增强存在因果联系。构造活动增强导致盘一井氢气在应力加载作用下出现高值异常变化，此次高值变化对应了唐山古冶 5.1 级地震。

（2）临界慢化方法计算得到的高频信息、方差  $Var$  与自相关系数  $Ar$  均出现了明显的同步高值

异常变化特征,其中  $Var$  变化尤为显著。唐山古冶 5.1 级地震发生后,异常逐渐恢复。分析结果显示由于区域构造应力增强,导致地下岩石产出大量微裂隙,水岩反应及深部氢物质上涌释放造成盘一井氢气浓度出现高值异常。

(3) 盘一井氢气  $R$  值为 0.48,  $R_0$  值为 0.43,  $R \geq R_0$ , 通过效能检验,预测优势时长为 80 ~ 110 d,表明盘一井氢气具有较好的映震效果,对短临预报具有较好指示意义,但对地点指示意义并不明显。

在资料收集及论文写作过程中得到了盘锦地震台有关人员的大力协助,两位审稿专家对本文提出了宝贵的意见与建议,在此一并表示感谢!

## 参考文献:

车用太,刘耀炜,何镛. 2015. 断层带土壤中  $H_2$  观测——探索地震短临预报的新途径[J]. 地震,35(4):1-10.

陈梦,杨龙翔. 2020. 河南豫北地区跨断层形变预报方法检验及效能评估[J]. 地震地磁观测与研究,41(4):121-128.

陈棋福,郑大林,高荣胜,等. 2002. 中国震例(1997~1999)[M]. 北京:地震出版社.

陈学芬,吴微微,刘雪梅,等. 2020. 汶川映秀地震台并孔逸出氢观测实验[J]. 地震研究,43(4):639-643.

崔博闻,岳晓媛,王丽红. 2021. 北京地区小震活动与北京及周边地区显著地震相关性研究[J]. 华北地震科学,39(4):87-94.

杜乐天. 2005. 地球排气作用的重大意义及研究进展[J]. 地质论评,51(2):174-180.

范树全,高清武. 1980. 氢气和甲烷与地震关系的实验研究[J]. 地震科学研究,(2):15-21.

范树全,苏盛虎,李霓. 1993. 京棉二厂并氢,氢气体的地震前兆异常特征及与地震关系的研究[J]. 地震学报,15(4):490-497.

范雪芳,张磊,李自红,等. 2016. 断裂带土壤气高精度氢异常分析[J]. 地震地质,38(2):303-315.

方震,张彬,李军辉,等. 2020. 地热温泉井与土壤逸出气中痕量氢的特征及差异性分析[J]. 地震工程学报,42(3):705-713.

冯玮,王真光,王剑秋,等. 1985. 在超声作用下玄武岩释放封闭氢实验研究[J]. 地震地质,7(4):49-55.

高丽娟,杨又陵,刘建明,等. 2013. 新疆 2 次中强地震前的临界慢化现象研究[J]. 内陆地震,27(4):311-318.

焦明若,夏彩韵,王喜龙,等. 2016. 辽宁地区中强震预测指标体系研究[J]. 防灾减灾学报,32(4):1-11.

康健,肖宁,高小其,等. 2019. 松原 5.7 级地震震中区土壤氢气变化特征[J]. 中国地震,35(2):277-285.

柯云龙,刘耀炜,张磊,等. 2018. 川滇地震预报实验场高精度氢观测

台阵建设分析[J]. 地震,38(3):35-48.

李琼,付虹,毛慧玲,等. 2017. 云南水温异常与  $M_s \geq 5.0$  地震关系研究[J]. 地震研究,40(2):233-240.

李新勇,朱成英,李艳萍,等. 2014. 新 04 号泉溶解气氢气异常特征分析[J]. 内陆地震,28(3):286-290.

林元武,翟盛华. 1994. 华北隐伏活动断裂  $H_2$  异常特征及其异常机制研究[J]. 地震地质,16(3):264-268.

刘耀炜,曹玲玲,平建军. 2004. 地下流体短期前兆典型特征分析[J]. 中国地震,20(4):372-379.

刘耀炜,范世宏,曹玲玲. 1999. 地下流体中短期异常与地震活动性指标[J]. 地震,19(1):19-25.

杉崎隆一,铃木和博,大井田徹,等. 1986. 地震活动与地下氢气逸出的关系[J]. 张魁林,译. 世界地震译丛,(4):39-43.

苏小芸,陈丽君,王文才,等. 2020. 甘东南地区水氢浓度的临界慢化现象研究[J]. 地震工程学报,42(5):1104-1110.

汤兰荣,吕坚,曾新福. 2017. 华东地区地震条带预报效能评估[J]. 地震,37(4):134-143.

佟占岭,王亚男,刘建光,等. 2000. 辽宁岫岩—海城 5.6 级地震前盘锦地区地下流体异常特征[J]. 东北地震研究,16(2):71-78.

王博,周永胜. 2017. 氢气与断层活动及地震的研究进展[J]. 地球物理学进展,32(5):1921-192.

王喜龙,贾晓东,钱蕊,等. 2020. 2013 年芦山  $M_s 7.0$  地震前南北地震带数字化水位、水温高频信息异常特征及效能分析[J]. 地震,40(2):100-116.

王喜龙,焦明若,王海燕,等. 2016. 中强震前辽宁地区流体异常特征与地震预测研究[J]. 地震,36(4):131-143.

王喜龙,李营,杜建国,等. 2017. 首都圈地区土壤气  $R_n, H_g, CO_2$  地球化学特征及其成因[J]. 地震学报,39(1):85-101.

王喜龙,王海燕,李彤霞,等. 2018. 盘一井水氢映震效能及  $R_n$  值迁移机理分析[J]. 防灾减灾学报,34(4):26-33.

王熠熙,李赫,王博,等. 2018. 2013 年岷县—漳县  $M_s 6.6$  地震前水氢浓度的临界慢化现象研究[J]. 地震,38(1):128-138.

向阳,孙小龙,高小其,等. 2018a. 新疆库勒勒断层氢气浓度的影响因素及其地震预测的潜在效能评价[J]. 中国地震,34(1):48-59.

向阳,孙小龙,王博. 2018b. 基于 Molchan 图表法的新疆流体资料预报效能检验[J]. 地震,38(3):103-114.

许绍燮. 1989. 地震预报能力评分[C]//国家地震局科技监测司. 地震预报方法实用化研究文集地震学专辑. 北京:地震出版社,586-589.

晏锐,蒋长胜,张浪平. 2011. 汶川 8.0 级地震前水氢浓度的临界慢化现象研究[J]. 地球物理学报,54(7):1817-1826.

于录,郝柏林. 1984. 相变和临界现象[M]. 北京:科学出版社.

张浪平,余怀忠,尹祥础,等. 2010. 加卸载响应比方法在结构灾变预测中的应用[J]. 工程力学,27(3):228-235.

张培仁,王基华. 1993. 氢——预报地震的灵敏元素[J]. 地震地质,15(1):69-77.

钟骏,王博,晏锐,等. 2021. 洱源温泉水氢预测效能检验及其水化学



- 特征[J]. 地震研究, 44(4): 564–571.
- Kita I, Matsuo S, Wakita H. 1982. H<sub>2</sub> generation by reaction between H<sub>2</sub>O and crushed rock; an experimental study on H<sub>2</sub> degassing from the active fault zone[J]. Journal of Geophysical Research, 87(B13): 10789–10795.
- Mcgee K A, Casadevall T J, Sato M, *et al.* 1982. Hydrogen gas monitoring at long Valley Caldera, California[R]. Technical Report, 1–12.
- Mcgee K A, Sutto A J, Sato M, *et al.* 1983. Correlation of hydrogen gas emissions and seismic activity at long Valley Caldera, California[J]. Eos, 64(45): 891.
- Satake H, Ohashi M, Hayashi Y. 1985. Discharge of H<sub>2</sub> from the atotsugawa and ushikubi faults, Japan, and its relation to earthquakes[J]. Pure and Applied Geophysics, 122(2–4): 185–193.
- Wakita H, Nakamura Y, Kita I, *et al.* 1980. Hydrogen release; new indicator of fault activity[J]. Science, 210(4466): 188–190.
- Xiang Y, Sun X L, Liu D Y, *et al.* 2020. Spatial distribution of Rn, CO<sub>2</sub>, Hg, and H<sub>2</sub> concentrations in soil gas across a thrust fault in Xinjiang, China[J]. Frontiers in Earth Science, 8: 554924.
- Zgonnik V. 2020. The occurrence and geoscience of natural hydrogen; a comprehensive review[J]. Earth – Science Reviews, 203(8): 103–140.
- Zhou Z H, Zhong J, Zhao J, *et al.* 2021a. Two mechanisms of earthquake induced hydrochemical variations in an observation well[J]. Water, 13: 2385.
- Zhou X, Yan Y, Fang W, *et al.* 2021b. Short – term seismic precursor anomalies of hydrogen concentration in Luojishan Hot Spring bubbling gas, Eastern Tibetan Plateau [J]. Frontiers in Earth Science, 8(586279): 1–12.
- Zhou Z H, Tian L, Zhao J, *et al.* 2020. Stress – related preseismic water radon concentration variations in the Panjin observation well, China (1994–2020) [J]. Frontiers in Earth Science, 8: 59628.

## Analysis of the Anomalies and Earthquake – prediction Efficiency of Hydrogen in Groundwater in Panjin 1st Well, Liaoning Province

WANG Xilong<sup>1</sup>, YANG Mengyao<sup>2</sup>, GUO Hongxia<sup>1</sup>, LIU Jianguang<sup>1</sup>

(1. Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110034, Liaoning, China)

(2. Huize Mining Technology Consulting Company of Liaoning Province, Shenyang 110035, Liaoning, China)

### Abstract

In order to analyze the anomalous characteristics and the earthquake – prediction efficiency of the hydrogen in Panjin 1st well, Liaoning Province, we firstly eliminate the background interference with hydrogen, then we discriminate hydrogen anomalies by the help of seismicity and the principle of critical slow – down in the study area. The results show that the anomalous, high – value fluctuation of hydrogen concentration in Panjin 1st well since October 2019 was closely related with the enhancement of the tectonic activity in South Liaoning Province and the Bohai Rim region, and the enhancement of the earthquake swarm in Gaizhou region. This high – value anomaly of the hydrogen is supposed to correspond to the 2020 Guye  $M_{\text{S}}5.1$  earthquake. Further, we use  $R$  – value to test the prediction efficiency of the hydrogen in Panjin 1st well. We get that the  $R$  – value of hydrogen in Panjin 1st well is 0.48, which is higher than the  $R$  – value of the underground fluid in Liaoning Province. This suggests that the hydrogen in Panjin 1st well can be used for earthquake prediction in Liaoning Province.

**Keywords:** hydrogen; characteristics of hydrodegen anomalies; earthquake – prediction efficiency; Panjin